



TITLE:

Particle Based Multiphysics Simulation for
Applications to Design of Soil Structures and
Micromechanics of Granular Geomaterials(
Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Fukumoto, Yutaka

CITATION:

Fukumoto, Yutaka. Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials. 京都大学, 2015, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19050>

RIGHT:

許諾条件により本文は2016/03/01に公開

(続紙 1)

京都大学	博士（農学）	氏名	福元 豊
論文題目	Particle Based Multiphysics Simulation for Applications to Design of Soil Structures and Micromechanics of Granular Geomaterials （粒子ベースのマルチフィジクスな数値シミュレーション手法の土構造物設計への応用と粒状地盤材料のマイクロメカニクス）		
(論文内容の要旨)			
<p>農村や都市で生活する私達人間の生活基盤である地盤や土構造物は、定められた安全基準によって評価・設計されているが、災害に見舞われた場合、それらの破壊を完全に防ぐことは難しい。災害時の被害を少しでも抑制するためには、地盤や土構造物がどのように壊れ、どのような範囲に影響を及ぼすのかを事前に予測しておくことが重要である。また、より精度の高い予測を実現するためには、災害の発生機構を巨視的にはもちろん、微視的な観点からも詳細に理解しておく必要がある。これらを達成する上で、粒子ベースの数値シミュレーション手法に着目した。</p> <p>本論文では、粒子ベースの数値シミュレーション手法として、DEM（Discrete Element Method, 個別要素法）とLBM（Lattice Boltzmann Method, 格子ボルツマン法）を採用し、これらを実物大スケールと微視的スケールの両面から地盤に関する諸問題へ応用することで、地盤や土構造物の大変形・破壊を予測するための数値モデルを構築するとともに、間隙流も含めた地盤材料の複雑な現象を土粒子レベルで理解することを目指した。本論文の内容は、全7章で構成されており、第1, 2章では全体の導入と手法の基本理論を述べた。研究内容は、前半の実物大スケールでの検討（第3, 4章）と後半の微視的スケールでの検討（第5, 6章）に分かれており、それぞれ以下のように要約される。</p> <ol style="list-style-type: none">1. 地盤工学における境界値問題へDEMを応用するために、地盤材料の破壊強度（内部摩擦角と粘着力）を適切に表現するためのシンプルな粒子間接触モデルを提案した。粒子集合体としての粘着特性を発揮させるための粒子間ボンドモデルと、粒子形状に起因するインターロッキング効果を発現させるための転がり摩擦モデルの各々を改良して組み合わせることで、モデルを構築した。必要な追加パラメータは2つしかないことが特徴である。2次元での要素試験シミュレーションによるパラメトリックスタディの結果から、地盤材料の破壊強度に対して所望の値を適切に表現するためのパラメータ決定方法を提案した。さらに、提案モデルの3次元条件での応用例として、貯水池の堤体と表面保護工に使用されるリップラップ材の強震時変形解析を行った結果、実際の被災状況と良い一致が見られた。2. 空積みの石積み構造物の動的挙動に工学的解釈を加えることができれば、経済面と環境面での利点を兼ね備えた石垣が設計の現場で柔軟に選択されるようになる可能性がある。そのような背景の下に、築石形状が石積み構造物の耐震メカニズムに与える影響を調べた。遠心模型実験を基に、地震時の石積み擁壁の倒壊モードと安定性を3次元DEMにより検証した。形状の比較は、直方体の築石と楔型の築石で行った。シミュレーション結果を実験結果と比較した結果、石積み構造物を構成する築石の形状により、倒壊モードと安定性が異なることが明らかになった。また、シミュレーション結果は定量的に実験結果と一致しており、石積み擁壁の地震時大変形を検証するには、材料の不連続性を考慮することができる粒子モデルを3次元条件で用いることが有効であることも示した。			

3. 土粒子はその複雑な形状に起因する回転抵抗効果を持つ。土粒子が堆積する際、すなわち、粒状体パッキングを行う際の粒子回転抵抗が担う役割を系統的に整理するために2次元DEMを用いた圧縮シミュレーションを行った。せん断過程における粒子回転抵抗の役割は既往の多くの研究で示されてきたが、パッキング過程における役割は十分に整理されていなかった。検討の結果、粒子回転抵抗は粒子の再配置の進展を阻害し、充填完了時の粒状体の幾何的な異方性を主応力の方向に対応して高めることが明らかとなった。また、ミクロ量である応力の異方性とマクロ量である土圧係数の間に関係式を導出することで、充填された粒状体の応力状態も粒子回転抵抗の度合いによって大きく変化することを示した。このような粒子集合体としてモデル化された土の初期状態は、その後の破壊挙動を評価する上で特に重要な情報でもある。
4. 砂のボイリングを題材として、地盤の浸透破壊現象に対する粒子-流体連成の直接数値シミュレーション手法の適用性を調べた。土粒子の運動はDEMで解き、間隙流体の挙動は粒子の粒径以下の解像度でLBMを用いて解いた。両手法を連成させることで、土粒子と間隙流体の相互作用も同時に解いた。その結果、数値的に予測した限界動水勾配の値とその理論値が良好に一致した。また、限界動水勾配前後の流れのパターンの急激な変化を微視的に捉えることができた。さらに、用いた連成モデルによって、粒子間の接触のネットワークが浸透破壊の進行とともに消失していく過程を確認した。これらの検討を通して、砂の浸透破壊現象をマクロな仮定を含めずに再現可能であることと、土の内部侵食などの他の問題への応用可能性も示した。

以上により、粒子ベースの数値シミュレーション手法を高度化し、対象となる問題の特徴やスケールに合わせて使い分けることで、地盤に関わる種々の問題に対して有用な結果が得られることを示した。最終の第7章では、全体のまとめを行うとともに、将来の展望についても言及した。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、近年しばしば発生する地震・洪水などに対する水利施設の防災・減災を目的として、粒子法のうちDEMとLBMを高度化させた解析モデルを開発した。このモデルを用いて、巨視的並びに微視的双方の観点から土構造物が地震力や浸透力を受ける際に生じる変形挙動や破壊に対する安全性を評価する方法と、その適用性を論じた。本論文は、従来の手法に比べて高い精度で水利施設の挙動予測を可能としたものであり、評価できる点は以下のとおりである。

1. 土構造物に関する境界値問題へDEMを応用するために、より少ないパラメータで材料の破壊強度（内部摩擦角と粘着力）を適切に表現できるシンプルな粒子間接触モデルを提案した。このモデルを用いて地盤材料の破壊強度に対して所望の値を適切に表現したうえで、さまざまな境界値問題を数値的に解いて土構造物の挙動予測や破壊評価を合理的に行うことを可能とした。3次元条件での応用例として、貯水池の堤体と表面保護工に使用されるリップラップ材の強震時変形解析を行い、東日本大震災における被災状況を再現できることを示した。
2. 擁壁のほか、城の石垣にも用いられる石積み構造物の防災を目的として、その動的挙動の評価に提案法を適用し、築石形状が石積み構造物の耐震性能に与える影響を明らかにした。築石の形状を直方体あるいは楔型の二者とした場合、地震時の石積み擁壁の倒壊モードと安定性がどのように異なるかを3次元で初めて示し、石積み構造物の耐震設計に有用な知見が得られた。
3. 貯水池や河川堤防の浸透破壊現象について、土粒子の運動はDEMを、間隙流体の挙動は粒子の粒径以下の解像度でLBMを連成させることで、土粒子と間隙流体の相互作用を同時に解くことを可能とした。この手段により浸透破壊が生じるとされる限界動水勾配前後の流れのパターンの急激な変化を微視的に捉え、粒子間の接触のネットワークが浸透破壊の進行とともに消失していく過程が確認された。砂の浸透破壊現象をマクロな仮定を含めずに再現可能であり、土の内部侵食などの他の問題へも応用できることを示した。

以上のように、本論文は粒子法による数値シミュレーションの高度化を図り、巨視的および微視的スケールの両面から、土構造物としての水利施設の大変形・破壊を予測する方法を提案したものであり、施設機能工学並びに水利施設の設計、耐震性能評価、管理・保全の実務に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成27年2月12日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）